

# 内部预埋空腔的混凝土厚板 温度效应试验研究与计算模拟

张鹏程, 徐继东

(厦门大学建筑与土木工程学院; 福建 厦门 361005)

**摘要:**连续整浇混凝土厚板的非荷载原因开裂一直是工程设计与施工的一个较难处理的问题, 从水化热温控和扩大混凝土可散热表面积的思路出发, 通过在厚度为 300 mm 的钢筋混凝土厚板内部均匀设置封闭圆管空腔, 试验研究了其内外温度变化过程, 并通过有限元数值模拟分析, 探索这一方法在混凝土连续厚板中用以减小温度效应的有效性. 结论认为在混凝土厚板内部设置均匀分布的空腔, 不但可以减少混凝土用量, 控制水化热总量, 而且可以改善内部传热环境, 控制内部温升, 可以显著减小大体积混凝土的温度变形和温度应力.

**关键词:**大体积混凝土厚板; 内部空腔; 温度效应

中图分类号: TU 375.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2008)03-0302-05

随着建筑单体规模的扩大, 混凝土整体浇注的连续厚板结构愈来愈多, 如大面积的地下人防工程, 大型商场, 车库等, 多跨连续、一次整浇的钢筋混凝土厚板无缝浇筑的长度往往远远超出 50 m, 有的达到 200 m 以上. 长度太大的混凝土连续厚板早期开裂问题很多见, 很多结构在施工期间就出现不同程度的裂缝. 排除早期因荷载因素造成的混凝土裂缝, 90% 以上的早期裂缝是由于混凝土早期变形(温度、收缩和膨胀、不均匀变形等)因素造成的. 水泥水化热造成的温度效应是钢筋混凝土楼板发生早期变形的主要原因<sup>[1]</sup>.

目前认为温度裂缝产生主要原因是由温差造成的. 温差可分为以下几种: 混凝土浇注初期, 产生大量的水化热, 由于混凝土是热的不良导体, 水化热积聚在混凝土内部不易散发, 常使混凝土内部温度上升, 而混凝土表面温度为室外环境温度, 这就形成了内外温差, 当这种内外温差在混凝土凝结初期产生的拉应力超过混凝土当时抗拉强度时, 就会导致混凝土开裂; 另外, 在拆模前后, 如果表面温度降低很快, 外部温度陡降, 也会直接导致表面裂缝的产生; 在混凝土硬化龄期内, 当混凝土内部达到最高温度后, 热量逐渐散发而达到使用温度或最低温度, 它们与先前最高温度的差值就是内部温差. 这 3 种温差都会产生温度应力, 甚至生成裂缝. 在这 3 种温差中, 最为主要是由水化热引起的内外温差<sup>[2]</sup>.

为了防止温度裂缝的产生, 就要最大限度的降低温差和减小混凝土的收缩. 目前常用的工程措施大致可分为化学方法和物理方法两大类. 化学方法包括调整水泥成分, 如掺加粉煤灰, 掺加减水剂、缓凝剂、引气剂等, 由于外加成分的掺量需要准确控制, 受实际工程随机性的影响很大, 质量稳定性难以控制. 物理方法包括控制骨料粒径, 严格控制施工过程, 从浇筑、养护、到拆模, 全过程进行温差控制, 如对大体积筏板有时需要通水冷却, 施工相当麻烦, 且对外部气温环境变化敏感, 对工期、造价都会产生严重影响<sup>[3]</sup>.

近几年兴起的现浇混凝土空心板技术为超长厚板的温度效应控制提供了一条有益的思路. 从概念上讲, 在混凝土厚板的中部均匀布设密闭空腔, 一方面可以显著减少内部混凝土用量, 直接降低内部水化热, 另一方面, 均匀布置的空腔, 为板的温度变形提供了新的吸收空间, 空腔内部空气也能有效吸收热量, 对于超长连续厚板不容易产生温度应力积聚, 可以有效防止开裂. 这种空心板, 常常可以做到腹板厚度与翼缘厚度相当, 这相当于对内外混凝土提供了相近的外部温度环境, 可以取得均衡内外温度变形的

作用. 均匀布置的空腔可以均匀的吸收温度变形, 可以有效避免大面积混凝土温度应力集中. 经过对几个现浇混凝土空心板工程的跟踪观测, 其对温度效应的减小十分有效. 这项技术无论设计、施工都很简便, 如果能经过实验研究得以证实, 将是简单有效的大体积混凝土温度效应防治的好方法, 具有很好的工程应用前景.

1 现浇混凝土空心板与实心板内部温度场对比试验

1.1 试验模型参数及结构布置

试验模型采用 4 块 1 m×1 m 的空心板和 1 块 1 m×1 m 的实心板进行对比试验, 温度测量前 24 h 每隔 1 h 测 1 次数据, 后 48 h 每隔 2 h 测 1 次数据. 空心板和实心板的测点布置图, 如图 1.

测点设在板的中心位置, 每个测点均在中心和表面各设置 1 个热电偶.

试验仪器: 温度测量采用 TM-211C 数字温度表, 温度传感器采用高精度的 Pt100 铂热电偶为感温传感器, 适用于液体和气体的温度, 可以作点温和表面温度的测量. 试验所用混凝土材料配合比如表 1.

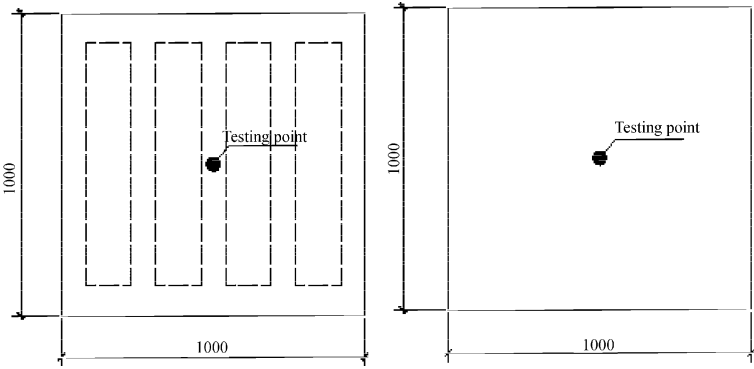


图 1 空心板和实心板的测点 布置图

Fig. 1 The testing point of hollow slab specimens( left) and solid slab specimens( right)

Tab. 1 Configuration of specimen concrete

Strength grade	Water / kg	Cement / kg	Sand / kg	Gravel / kg	Sand percentage ratio	Pulverized fuel ash / kg	Coagulant / kg	Slump / mm
C25	176. 00	245. 00	743. 00	1 069. 00	41. 00	92. 00	4. 33	85

( 试验时间: 2006 12 12~ 2007 01 12, 试验地点: 厦门大学结构实验中心) .

1.2 试验结果初步分析

试验测得混凝土水化及硬化过程中, 空心板和实心板内部温升变化过程结果如图 2、图 3 所示. 从温度曲线可以看出, 不论是空心板还是实心板最高温度都出现在浇筑后 12 h 左右, 此后温度逐渐下降, 最后内部温度和表面温度趋于一致. 整个过程都可分为热胀和冷缩两部分. 空心板内部的最高温度为 31. 9℃, 实心板内部的最高温度为 34. 0℃. 实心板内外温差比空心板的内外温差要大得多.

因为水化的过程首先是放热的热胀过程, 通常由于周边梁柱及模板约束, 所以这个过程的应力以压应力为主. 拉应力到后面降温阶段会出现, 混凝土楼板的温度开裂主要是在收缩阶段. 图 2 和图 3 的内

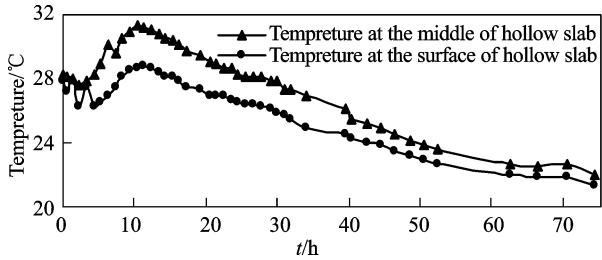


图 2 空心管上部实心区域实测温度曲线

Fig. 2 Hydration temperature developing course of hollow slab

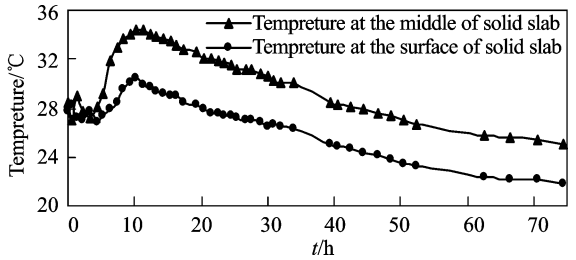


图 3 实心板中心和表面实测温度曲线

Fig. 3 Hydration temperature developing course of solid slab

外温度曲线下降斜率和幅度的比较显示, 实心板内外温差为 5℃, 且持续时间很长. 而同等条件下的空心板, 内外温差最大的区域的早期峰值约 3℃, 随后内外温差相对平稳快速的下降, 60 h 后基本消失.

这表明, 空心板比实心板更容易散热, 内外混凝土的温度接近, 变形步调一致. 其养护工期要求可以比实心板低很多, 对快速施工的适应性更强. 由于实心板内部高温持时长, 出现温度裂缝的几率比空心板高很多, 例如过早拆模, 在外部温度应力已较高的情况下, 由于拆除支撑, 自重带来的拉应力增加可以立刻导致开裂. 显然空心板在这方面比实心板有明显优势.

## 2 混凝土板的温度效应的计算模拟

### 2.1 混凝土的水化热模型的选取

实际工程中, 不可能对各种板都进行试验研究, 对混凝土板的温度效应的尽量准确的有限元数值模拟已成为一个逐渐被接受的可取的方法.

水泥的水化是水泥与水反应生成新的固相物质, 水化是放热反应, 混凝土截面温升分布取决于水泥水化热的速度以及混凝土向周围环境的散热速度. 影响混凝土放热的因素包括: 水泥品种、水泥用量、混合材料品种、混合材料用量和浇筑温度. 水泥品种对绝热温升的影响主要是由于水泥矿物成分的不同. 水泥矿物成分中发热率最快和发热量最大的是铝酸三钙(C3A), 其他成分依次为硅酸三钙(C3S)、硅酸二钙(C2S)和铁铝酸四钙(C4AF). 用 C3S 和 C3A 含量较多早期强度较高的水泥配制混凝土, 早期水泥水化快, 放热量大, 混凝土温度高硬化快, 早期强度高, 弹性模量增大, 徐变较低, 早期抗拉强度增长滞后, 缓释收缩应变的徐变较小, 无以释放收缩应力, 致使混凝土因温度收缩而开裂. 水泥用量相同但水泥品种不同的混凝土绝热温升也不同, 且水泥越细, 发热速率越快, 但是水泥细度不影响最终发热量.

水泥水化热模型是依赖于龄期的, 常用的有以下几种式.

#### (1) 双曲线式<sup>[4]</sup>

蔡正咏建议用下列双曲线式表示水化热:  $Q(t) = \frac{Q_0 t}{n + t}$ , 式中,  $Q(t)$  为水泥随时间变化放出的热量, kJ;  $n$  为常数;  $Q$  为水泥最终发热量, kJ,  $t$  为时间, d.

#### (2) 复合指数式<sup>[5]</sup>

$Q(t) = Q_0(1 - e^{-at^b})$ , 式中,  $t$  为时间, d; 对普通硅酸盐水泥, 32.5 水泥的最终水化热  $Q_0 = 330$  kJ/kg, 系数  $a = 0.69$ ,  $b = 0.56$ ; 42.5 水泥的最终水化热  $Q_0 = 350$  kJ/kg, 系数  $a = 0.36$ ,  $b = 0.74$ .

#### (3) 指数式<sup>[2]</sup>

$Q(t) = Q_0(1 - e^{-mt})$ , 式中,  $Q_0$  为水泥最终发热量, kJ;  $m$  为水泥品种与放热速度有关的系数, 对普通硅酸盐水泥  $m = 0.43 + 0.0018W$ , 早强水泥  $m = 0.63 + 0.0018W$ , 矿渣水泥  $m = 0.55 + 0.001W$ .

本文利用指数式计算混凝土水化热, 取  $W = 350$  kg,  $Q_0 = 350$  kJ/kg,  $m = 0.43 + 0.0018 \times 350 = 1.06$ , 于是, 可得水泥水化热曲线如图 4 所示.

### 2.2 有限元温度场理论

混凝土的水化热分析属于一般三维瞬态热力学问题, 瞬态温度场变量在直角坐标系中满足微分方程<sup>[4]</sup>:

$$\rho c \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial \phi}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial \phi}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial \phi}{\partial z}) - \rho Q = 0$$

(在  $\Omega$  内)

$\phi = \bar{\phi}$  (在  $\Gamma_1$  边界上)

$$k(\frac{\partial \phi}{\partial x} n_x + \frac{\partial \phi}{\partial y} n_y + \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z) = q \text{ (在 } \Gamma_2 \text{ 边界上)}$$

$$k(\frac{\partial \phi}{\partial x} n_x + \frac{\partial \phi}{\partial y} n_y + \frac{\partial \phi}{\partial z} n_z) = h(\phi_a - \phi) \text{ (在 } \Gamma_3 \text{ 边界上)}$$

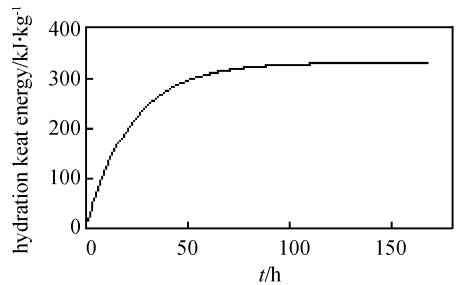


图 4 水泥水化热曲线

Fig. 4 Cement hydration heat curve

其中:  $c$  为混凝土的比热,  $J/(kg \cdot K)$ ;  $\rho$  为混凝土的密度,  $kg/m^3$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $k$  是混凝土的导热系数,  $W/(m \cdot k)$ ;  $Q=Q(x,y,z,t)$  是混凝土内部的热源密度,  $W/kg$ ;  $n_x, n_y, n_z$  是边界外法线的方向余弦;  $\bar{\phi}(\Gamma,t)$  是在边界上  $\Gamma_2$  的给定温度;  $q=q(\Gamma,t)$  是在边界  $\Gamma_3$  上的给定的热流密度;  $h$  是对流换热系数,  $W/m^2 \cdot K$ ;  $\phi_a=\phi_a(\Gamma,t)$ , 对于  $\Gamma_3$  边界, 在自然对流条件下,  $\phi_a$  是外界环境温度; 在强迫对流条件下,  $\phi_a$  是边界层的绝热壁温度.

如果把空间  $\Omega$  离散为有限多个单元体, 就可以得到有限元求解方程:  $C \dot{\phi} + K\phi = P$ . 其中,  $C$  是比热容矩阵;  $K$  是热传导矩阵;  $P$  是温度荷载列阵;  $\phi$  是结点温度列阵;  $\dot{\phi}$  是结点温度对时间的导数列阵. 矩阵  $C, K$  和  $P$  的元素由单元的相应的矩阵元素集成.

2.3 模型参数及边界条件

考虑柱距为  $7.8\text{ m} \times 7.0\text{ m}$  的框架结构, 采用空心楼盖体系, 板厚  $250\text{ mm}$ , 主梁为  $500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  的暗梁, 混凝土等级为 C25. 空心管的长度为  $1\text{ m}$ , 直径为  $150\text{ mm}$ , 空心管端部有  $100\text{ mm}$  宽的实心区域(称之为管端肋), 空心管之间有  $50\text{ mm}$  宽的实心区域(称之为管间肋), 空心楼板板顶和板底均有  $50\text{ mm}$  厚的实心面层, 靠近梁的边沿留有  $100\text{ mm}$  宽的实心区域. 根据对称性取 1 块楼板的  $1/4$  建立有限元模型, 如图 5 所示. 计算时假设一天的最高气温为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 最低气温为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

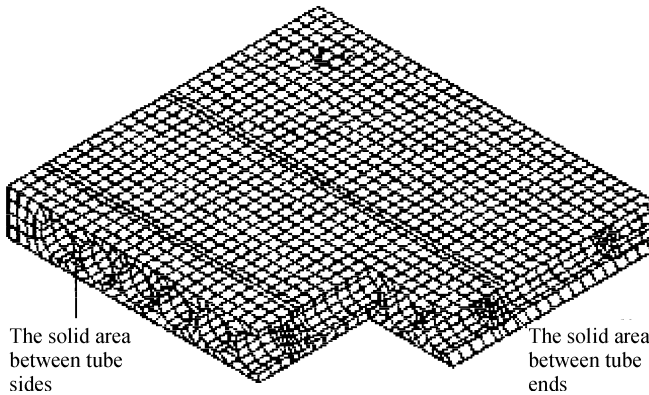


图 5 现浇混凝土空心有限元模型

Fig. 5 Cast in place concrete hollow finite element model

2.4 数值模拟结果

由于空心板内部结构比较复杂, 可以取其几个有代表性的位置观察其温度曲线, 位置分别选在管端肋实心区域, 管间肋实心区域和管子对应的上部实心区域. 对空心板的数值模拟结果如图 6. 作为方法正确性验证手段, 采用同样水泥水化热曲线对相同外观厚度的实心板进行了数值模拟, 结果如图 7.

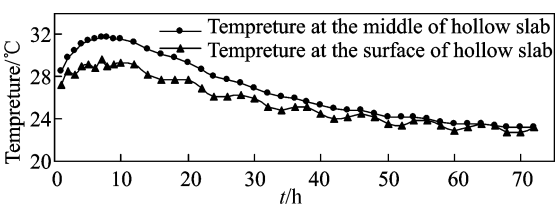


图 6 管端肋和管间肋中心和表面的温度曲线

Fig. 6 Simulation result of hydration temperature curve of hollow slab

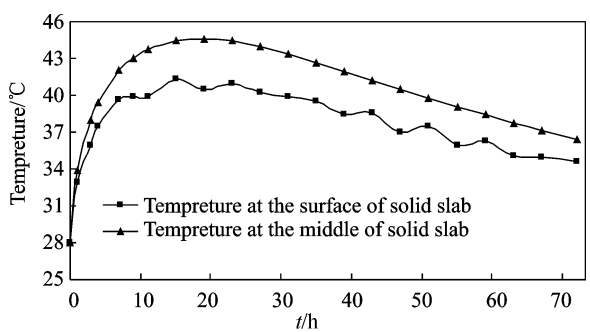


图 7 空心管上部实心区域温度曲线

Fig. 7 Simulation result of hydration temperature curve of solid slab

3 数值模拟与实验结果的对比分析

通过对实验结果和数值模拟结果可以看出, 二者基本吻合, 通过所选模型进行数值模拟来研究大块连续浇筑的大体积混凝土大板的混凝土水化硬结阶段的温度效应是可行的. 模拟结果的准确与否关键

在于混凝土的水化热模型,模型很好地反应实际的情况下计算结果会比较理想,另外边界条件的影响也是非常关键的.对比分析还可得出以下工程应用的建议结论:

(1)空心板由于空腔的存在整个板内温度较实心板有所降低,特别是在空心管和管间肋的位置板内外的温差相差很小( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内),这样可以减小温度收缩,对减小楼板的温度收缩是十分有利的;

(2)在空心管和管端肋的交接处两者的温差较大,如果局部出现受热不均匀很可能产生沿着管端肋产生裂缝;但通常按照结构构造要求,管短肋中配有足够的构造钢筋,可以有效防止给该类问题的发生.

(3)空心板内部空腔的存在可以减小对混凝土温度收缩变形的约束,从而可以减小收缩开裂的概率;

(4)从混凝土养护的角度讲,不论是空心板还是实心板控制板内外温差是很重要的,正常情况下实心板和空心板的内外最大温差都比较小,但是随着楼板的厚度加大,内外温差增大幅度会很大,例如,厚度为  $400\text{ mm}$  的实心板和同样外观厚度的空心板内外温差分别为  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 如果遇到表面温度突变而导致内外温差过大仍可能导致楼板开裂.

(5)从材料的角度讲,应该控制混凝土中水泥的用量每  $\text{m}^3$  混凝土多用  $10\text{ kg}$  水泥就可以增加  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温升.另外,楼板可以采用较低标号的低水化热的水泥,即可以满足工程安全的要求又可以减小楼板的温度收缩.

## 4 结 语

本文通过在厚度为  $300\text{ mm}$  的钢筋混凝土厚板内部均匀设置封闭圆管空腔,试验研究了其内外温度变化过程,并通过有限元数值模拟分析,验证了这一方法在大体积混凝土连续厚板中用以减小温度效应的有效性.结论认为在混凝土厚板内部设置均匀分布的空腔,不但可以减少混凝土用量,控制水化热总量,而且可以改善内部传热环境,控制内部温升,可以显著减小大体积混凝土的温度变形和温度应力.

## 参考文献 References

- [1] 韩素芳,耿维恕,等.钢筋混凝土结构裂缝控制指南[M].北京:化学工业出版社,2006,2.  
HAN Shu fang, GENG Wei shu, et al. Crack Control guidelines of reinforced concrete structure[M]. Beijing : Chemical Industry Press, 2006. 2.
- [2] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003.13-39.  
GUO Zhen hai, SHI Xu dong. Reinforced concrete theory and analyse[M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2003
- [3] 郝 鹏.钢筋混凝土楼板温度收缩裂缝的控制研究[D].天津:天津大学建筑工程学院,2004.  
HAO Peng. Reinforced concrete floor temperature control of the shrinkage cracks[D]. Tianjin : Tianjin University School of Construction, 2004.
- [4] 庄小军.混凝土拱坝温度场应力场仿真方法研究[D].天津:天津大学建筑工程学院,2005.  
ZHUANG Xiao jun. Concrete arch dam temperature stress field simulation method[D]. Tianjin : Tianjin University School of Construction, 2005.
- [5] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.  
WANG Xu cheng. Finite element methods[M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2003.
- [6] 祝效华,余志祥,等.ANSYS 高级工程有限元分析范例精选[M].北京:电子工业出版社,2004.  
ZHU Xiao hua, YU Zhi xiang, et al. ANSYS senior engineering finite element analysis of selected examples[M]. Beijing : Electronics Industry Press, 2004.

(下转第 375 页)

- [8] 日本建筑学会. 隔震结构设计[M]. 第3版. 北京: 地震出版社, 2006.  
 Edited by Japan Society of Architecture. Recommendation for the Design of Base Isolated Buildings[M]. Beijing: Earthquake Press, 2006.
- [9] GB 20688.3 2006, 橡胶支座 第3部分: 建筑隔震橡胶支座[S].  
 GB 20688.3 2006, Rubber bearings Part 3: Elastomeric seismic protection isolators for buildings[S].
- [10] 印度橡胶学会. 橡胶工程手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2002.  
 By Indian Rubber Institute. Rubber Engineering[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2002.

## Research on mechanical characteristics of 1200 laminated lead steel plate laminated rubber bearing isolation bearings for building

ZHANG Xue-zhen<sup>1,2</sup>, ZHOU Fu-lin<sup>1,2</sup>, FENG De-min<sup>3</sup>, XU Li<sup>1,2</sup>,  
 JIN Jian-min<sup>1,2</sup>, SHEN Chaoyong<sup>1,2</sup>

- (1. Earthquake Engineering Research Test Center Guangzhou University; 2. Guangzhou University and Guangdong Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technique, Guangzhou 510405, China;  
 3. Technology Development Division of Fujita Corp, Kanagawa Atsugi, 243-0125, Japan)

**Abstract:** Tests are conducted on mechanical characteristics of laminated lead steel plate laminated rubber bearing isolation bearing ( $D=1200$  mm) with an experimental study, including vertical compression property, horizontal shear property and ultimate deformation property. The influence of vertical pressure and horizontal shear deformation are obtained, analyzed and compared with three kinds of used type steel plate laminated bearing isolation bearings ( $D=100$  mm;  $D=1000$  mm;  $D=600$  mm). It is proved that the bearing ( $D=1200$  mm) made by China has good properties and can be extended use for in actual projects, providing designs foundation for the seismic isolation and shock absorption control of structural high rise buildings.

**Key words:** *leading rubber bearings; steel plate laminated rubber bearing isolation; property; rigidity; yield force; damping*

**Biography:** ZHANG Xue-zhen, Superior Experimentor, Guangzhou 510405, P. R. China, Tel: 0086-13342883983, E-mail: zhuangzen@yahoo.com.cn

(上接第 306 页)

## Test and simulation on performance of hydration heat in cast in situ concrete hollow slab

ZHANG Peng-cheng, XU Ji-dong

(School of Architecture & Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** In concrete construction, large size slab is used with a mass of concrete cast in situ continuously to minimize the deformation and the crack costs much. Based on an idea to embed hollow boxes or tubes into the web of slab to control the hydration deformation and cracking, a series of experimental tests and simulation study were performed. The result showed this new structure worked well. For large dimension concrete slab system, making the slab web hollow inside is a cost effective method to reduce non load caused cracking.

**Key words:** *hydration heat test; cast in situ concrete slab; finite element method*

**\*Biography:** ZHANG Peng-cheng, Associate Professor, Xiamen 361005, P. R. China, Tel: 0086 15860721056, E-mail: Zpcchina@yahoo.com.cn.